微纳耦合表面池沸腾强化传热的实验研究

胡柏松　陈兴林　张少峰　王德武

（河北工业大学化工学院，天津 300130）

摘要：以去离子水为工质，拟在钛板表面利用线切割进行微槽处理，采用阳极氧化法制备出二氧化钛纳米管阵列的微纳耦合表面，研究该表面的强化沸腾传热性能。通过场发射扫描电镜表征其微观结构形貌，利用接触角测量仪检测表面的静态接触角。结果表明，与光板相比，微槽结构增大了传热表面，规整的纳米管阵列具有亲水特性，接触角明显减小，微纳耦合表面的传热系数和临界热流密度分别达到了 15.5 kW m^{-2}·℃$^{-1}$和 420.1 kW m^{-2}, 分别提高了 158.3%和 50%。结合实验现象及机理分析可知，微纳耦合表面的微通道结构为气泡继续生长提供了支撑，有效避免了换热壁面被合并的大气泡完全覆盖；过热度达到一定温度后，更小的活化中心被激活，过热度随着热流密度的上升出现下降的趋势。微纳耦合表面对池沸腾具有强化作用。

关键字：微纳耦合；池沸腾；传热；二氧化钛纳米阵列

中图分类号：TK124　　　**文献标识码：**A

The Experiment Study of Pool Boiling Heat Transfer Enhancement on Micro-nano Surface

HU Bai-Song　CHEN Xing-Lin　ZHANG Shao-Feng　WANG De-Wu

(School of Chemical Engineering and Technology, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: The heat transfer enhancement on different surface was studied with distilled water. The surface of pure titanium plate was deal with micro-channels by wire-cutting，and then TiO_2 nanotube layers were prepared on this surface, which was micro-nano surface. Microstructures of TiO_2 nanotubes were characterized by SEM. Static contact angle was obtained on the coatings via optical contact angle measuring device. The results show that micro-channels increase the heat transfer surface, and the surface with TiO_2 nanotubes arrays with hydrophilic properties, contact angle decrease obviously. Compared with the untreated titanium plate, both micro-channels and the surface with TiO_2 nanotubes arrays were enhanced heat transfer coefficient and critical heat flux. The micro-nano surface improved the heat transfer coefficient and the critical heat flux by 158.3% and 50%. The heat transfer coefficient was 15.51 kW m^{-2}·℃$^{-1}$ and CHF was 420.1 kW m^{-2}. According to the experimental phenomenon and mechanism analysis, the microchannel structure propped bubbles up to grow, effectively avoid that the heat transfer surface completely was covered and merged by large bubbles. The smaller vaporization core activated at a higher super heat and the super heat doesn't increase with the increasing heat flux anymore. The micro-nano coupling surface can enhance the pool boiling.

Key words: micro-nano；pool boiling；heat exchange；TiO_2 nanotubes arrays

0 引 言

强化沸腾传热在工业生产应用上有着重要意义。学者们通过机械加工方法、金属烧结等方法在沸腾表面进行微加工，显著提高沸腾传热效果。Demir 等[1]考察了三种 900、1800、3200 nm 硅棒纳米结构，对比硅平板，强化传热效果提高了 254%。Yu 等[2]以铜板为基板，加工出不同尺寸的矩形阵列，临界热流密度（Critical Heat Flux，简称 CHF）较平板提高了 5 倍。Das 等[3]在铜柱表面进行平行或

收稿日期:

基金项目：河北省科技支撑计划项目（No.12276711D）

作者简介：胡柏松（1981-），男，实验师，博士研究生，主要从事纳米材料表面传热性能研究。**通信作者：**张少峰，教授/博导，E-mail：shfzhang@hebut.edu.cn

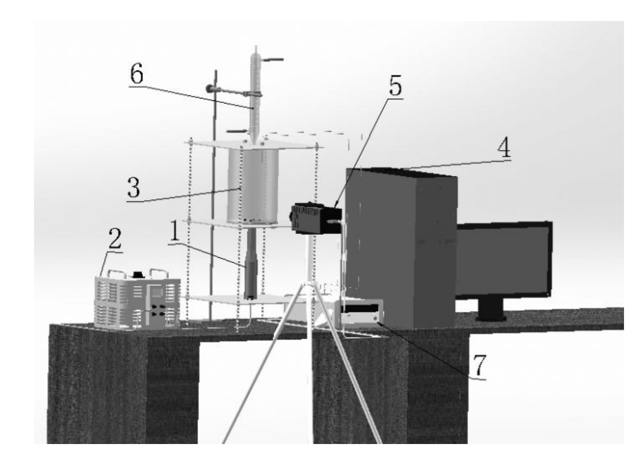
交叉通道处理，通道端部进行环形槽、矩形、圆形处理后，CHF 及传热系数（Heat Transfer Coefficient，简称 HTC）均有不同程度的增强。Kim 等[4]研究微观结构可以有效提高沸腾传热及 CHF，HTC 提高了 300%，CHF 提高了 350%。Mostafa 等[5]总结了近年来微纳米多孔在池沸腾实验的应用，均能提高 HTC 及 CHF。Jun 等[6]在铜表面制备微孔涂层，HTC 最大为 400 kW/m² K，CHF 达到 2.1 MW/m²。Das 等[7]利用电子束气相沉积方法在金属表面制备了二氧化硅纳米涂层，降低了过热度 36%，HTC 提高了 58%。Sarangi 等[8]利用自由粒子技术在加热铜表面制备出铜颗粒层，壁面过热度现状明显低于烧结涂层。Pratik 等[9]使用化学气相沉积法，以硅为基板，利用泡沫状的 h-BN（六角氮化硼）材料为粘结层。HTC 及 CHF 均有提高，过热度降低的 30%。Xu 等[10]通过电沉积烧结法制备复合微纳多孔表面，此表面具有较高的 CHF 值，达到 239 W/cm²。范永坚等[11] 研究内表面烧结性多孔管对降膜蒸发换热效果的影响。实验结果为多孔管的管内降膜传热系数是光管的 2.03 倍，总传热系数是光管的 1.78 倍。

学者们发现通道微槽及纳米多孔涂层相结合，也可以大幅度地提高强化效果。Arvind 等[12]制备出 300 μm、500 μm、762 μm 三种通道，然后烧结出纳米涂层，CHF 可达到 420 W/cm²，传热系数为 2.9 MW/m² K 。Deng 等[13]通过固态烧结铜粉方法，在 X 型凹槽和环形腔体上制备出多孔结构，分别以去离子水和乙醇为工质进行池沸腾实验，多孔结构显著减少过热度，提高了 HTC，改善了液体润湿性，避免了传热恶化。Patil 等[14]在翅片式的微通道上，采用电解沉积法制备微孔涂层，CHF 为 3250 kW/m²，HTC 达到 995 kW/m² K 。本文以钛板为基础，机械加工出微米级的微槽结构，运用阳极氧化法制备出 TiO_2 纳米管阵列表面。以去离子水为工质，对微纳耦合表面的强化传热特性进行了研究。

1 实验设计

1.1 实验装置

本文实验装置如图 1 所示，由热源、数据采集和图像采集三部分组成。热源是一根的电加热棒，最大发热量为 600 W。图像采集部分为高速摄像机 (PCO 1200hs)和一个 LED 光源组成的。数据采集单元包括数据采集仪(KEYSIGHT 34972A)和 PT100 热电阻五根，其准确度为±0.05 ℃，具体位置如图 2 所示（T_1，T_2，T_3处）。



1、加热棒 2、调压器 3、水槽 4、电脑 5、高速摄像机 6、冷凝器 7、数据采集系统

图 1 池沸腾实验装置

Fig.1 Schematic diagram of the pool boiling experiment device

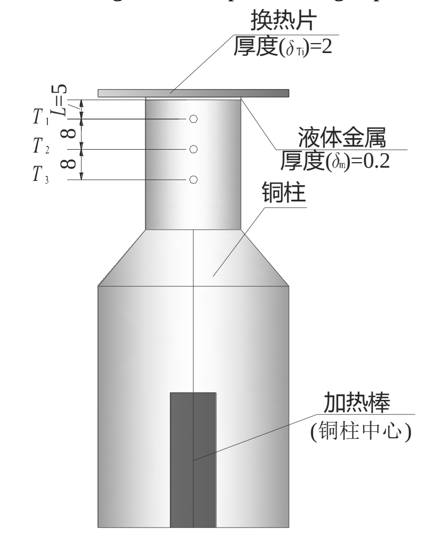


图 2 加热棒与热电阻安装示意图

Fig.2 Installation size of heater and thermal resistance

1.2 微纳耦合表面的制备及表征

以 50×50×2 mm、纯度为 99.9%钛板为基板，利用线切割技术，加工出微通道结构，如图 3 所示。微通道的尺寸为槽深 400 μm，槽宽 762 μm，肋板宽度为 200 μm。线切割完成后，采用阳极氧化工艺[15]，制备出纳米管多孔表面。微观形貌采用场发射电子显微镜（Nova Nano SEM450，美国 FEI 公司）进行表征，采用光学接触角测定仪（DAS30，德国 KRUSS）测量静态接触角。

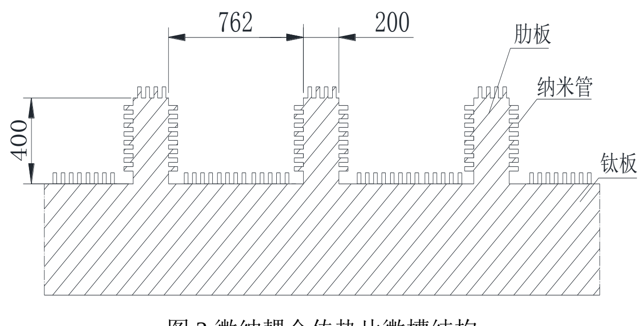


图 3 微纳耦合传热片微槽结构

Fig.3 Micro channel structure of Micro-nano coupled heat transfer piece

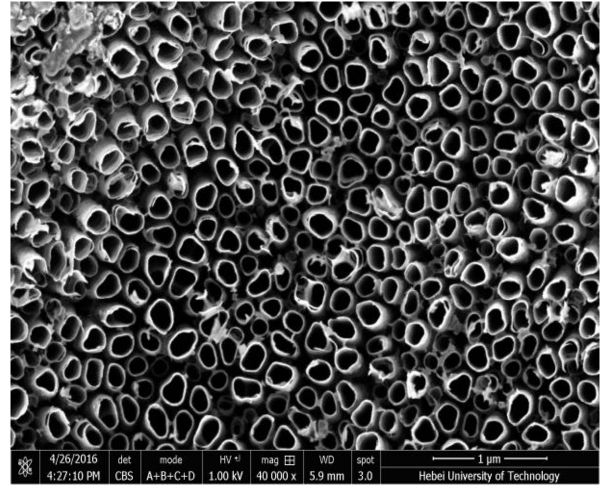


图 4 TiO_2 微观形貌（SEM 图）

Fig.4 SEM photograph of TiO_2 nanotube array

阳极氧化后形成了纳米管阵列结构，其孔径大小分布在 150-200 nm 之间，如图 4 所示。以去离子水为测试溶液，测得光板表面的静态接触角为 45.2 °，纳米管多孔表面的静态接触角为 27.3 °，表现出亲水性，如图 5 所示。

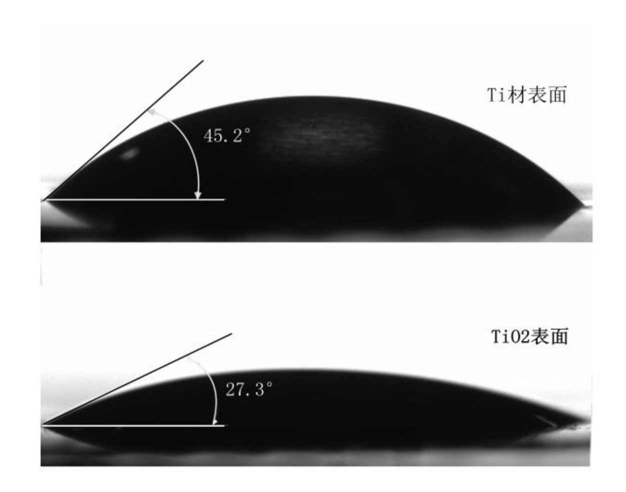


图 5 Ti 材光滑表面与 TiO_2 纳米阵列表面的静态接触角比较

Fig.5 Static contact angle of smooth surface and nanometer array surface

1.3 数据处理

对铜柱上三个测温点测量数据的分析处理，其数据拟合图像如图 6 所示，极差值 R^2 在 0.99 以上，说明热量传递满足一维热传导。

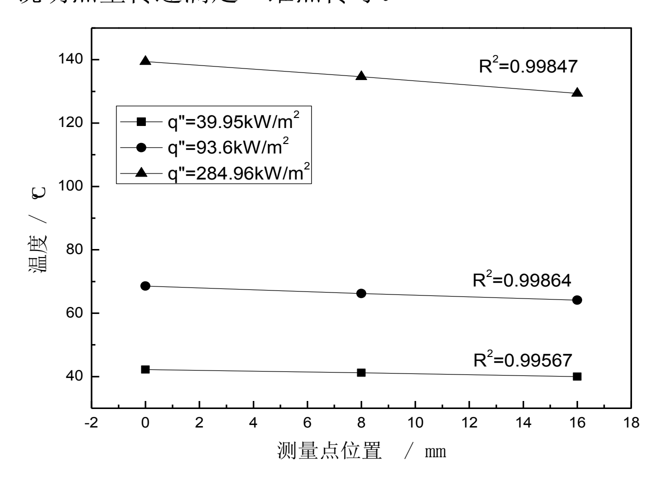


图 6 不同热流密度下加热棒热量传递分布

Fig.6 Temperature distribution of heater at different heat fluxes

实验中的热流密度 q'' 可以表示为

$$q'' = \frac{UI}{L^2} \qquad (1)$$

其中，U、I 分别为铜柱上的电压和通过铜柱的电流，L 为铜柱上表面方形的边长大小。根据傅里叶热传导定律就可以推算出换热片表面的温度 T_w（该温度为肋板表面的温度）：

$$T_w = T_1 - q''\left(\frac{L_1}{\lambda_{cu}} + \frac{L_2}{\lambda_{Ag}} + \frac{L_3}{\lambda_{Ti}}\right) \qquad (2)$$

其中，λ_{cu}、λ_{Ag}、λ_{Ti} 分别为纯铜的导热系数、液态金属的导热系数和钛板的导热系数。T_1 为最上端热电阻温度、L_1、L_2、L_3 分别为最上端热电阻中线距铜柱上表面距离、液态金属厚度和换热壁面厚度。

由此就可以得到样板表面的过热度 ΔT_w：

$$\Delta T_w = T_w - T_l \quad (3)$$

其中 T_l 为容器内部的液体温度。换热系数 h 为

$$h = \frac{q''}{\Delta T_w} \quad (4)$$

热量损失以输入不同热通量和去离子水为介质进行估算，是通过一段时间内输入装置的总热量与装置出口得到的蒸汽冷凝量为所需要的蒸发潜热的差值得到的。实验整体用保温棉隔热，尽量减少热量损失。通过热量损失计算，可知热量损失在 5%之内。

1.4 不确定性分析

实验不确定度主要考虑测量误差，表 1 中列出了实验测量参数与不确定性。

表 1 实验中测量参数与不确定性

Tab.1 Measurement parameters and the uncertainty

参数	不确定性	测量值	误差
L_1	0.02	5.0	0.4%
L_2	0.01	0.2	5.0%
L_3	0.01	2.0	0.5%
L	0.2	25	0.8%
I	0.0023	0.12	1.92%
U	0.35	30	1.17%
T	±0.05℃		

不确定性的推倒关系式如下：

$$U_{T_w} = \left[U_{T_1}^2 + \left(\frac{L_1}{\lambda_{cu}} + \frac{L_2}{\lambda_{Ag}} + \frac{L_3}{\lambda_{Ti}} \right)^2 U_{q''}^2 + \left(\frac{q''}{\lambda_{cu}} \right)^2 U_{L_1}^2 + \left(\frac{q''}{\lambda_{Ag}} \right)^2 U_{L_2}^2 + \left(\frac{q''}{\lambda_{Ti}} \right)^2 U_{L_3}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$\frac{U_{q''}}{q''} = \left[\left(\frac{U_U}{U} \right)^2 + \left(\frac{U_I}{I} \right)^2 + \left(\frac{U_L}{L} \right)^2 + \left(\frac{U_{q''loss}}{q''loss} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$\frac{U_h}{h} = \left[\left(\frac{U_{q''}}{q''} \right)^2 + \left(\frac{U_{T_w}}{T_w} \right)^2 + \left(\frac{U_{T_l}}{T_l} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

对池沸腾装置测量参数的不确定性进行分析，以光板进行重复性实验，实验中最大误差不超过 5%，如图 7 可知，两次实验数据基本重合，证明实验的可靠性。

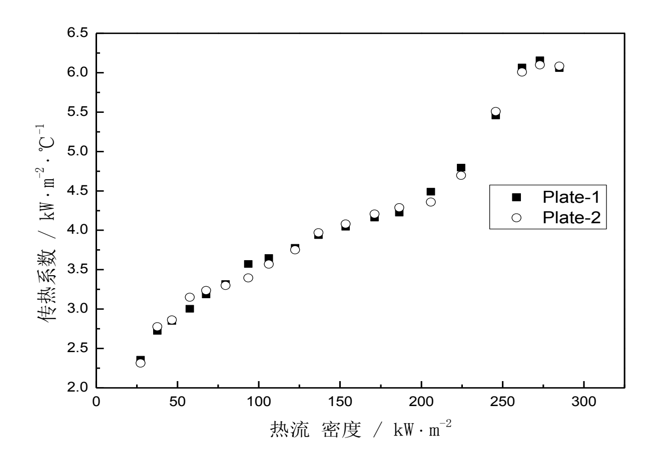


图 7 传热实验的重复性验证

Fig.7 Repeatability of heat transfer experiment

2 实验现象及结果分析

2.1 传热性能测试

将不同处理方法的表面进行池沸腾实验研究，其沸腾曲线如图 8 所示。

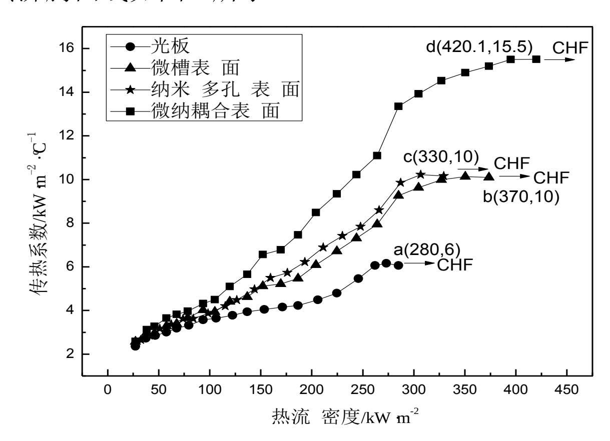


图 8 传热系数随热流密度变化曲线

Fig.8 The changing curve between heat transfer coefficient and heat flux density

未处理光板的 HTC 和 CHF 为 6 kW m^{-2}·℃$^{-1}$和 280 kW m^{-2}（a 点）。微槽表面、纳米多孔表面和微纳耦合表面的 HTC 和 CHF 均有提高。微槽表面的 HTC 和 CHF 分别达到了 10 kW m^{-2}·℃$^{-1}$ 和 370 kW m^{-2}（b 点）, 比光板提高了 60%和 17.8%；纳米多孔表面的 HTC 和 CHF 分别达到了 10 kW m^{-2}·℃$^{-1}$ 和 330 kW m^{-2}（c 点），比光板分别提高了 67%和 17.8%；微纳耦合表面的 HTC 和 CHF 达到了 15.5 kW m^{-2}·℃$^{-1}$和 420.1 kW m^{-2}（d 点），比光板提高了 158%和 50%。

在相同热流密度下，微槽表面、纳米多孔表面和微纳耦合表面过热度明显减少，如图 9 所示。热流密度为 200 kW m^{-2}，光板对应的过热度为 46 ℃（a 点），而其他表面分别为 34 ℃（b 点）、32 ℃（c 点）和 24 ℃（d 点）。同时可以发现，其壁面过热度不再随着热流密度的上升而上升，出现有所下降趋势，曲线图中表现出“后弯”，该现象在汪亚桥 等[16]实验中也曾出现。产生的主要原因可能在于纳米多孔结构的孔径从 150-200 nm 不等，当过热度不高时，只有大孔形成气化穴，但当壁面过热度超过一定值后，孔壁的孔隙形成了大量的活化穴，使得壁面的过热度几乎不再随着热流密度的上升而上升，甚至还有所下降。

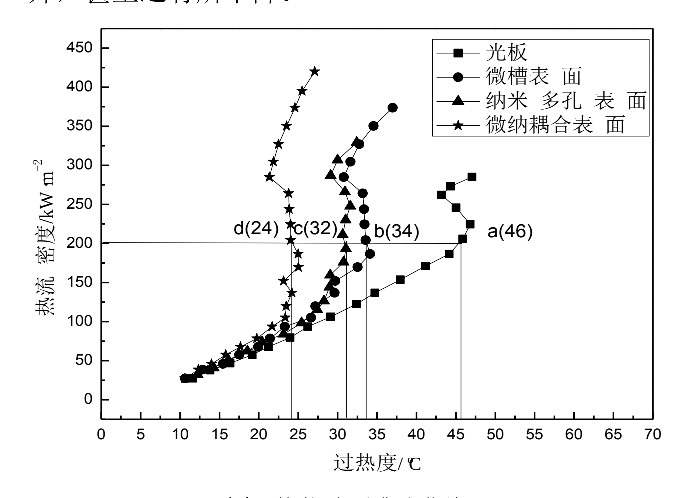
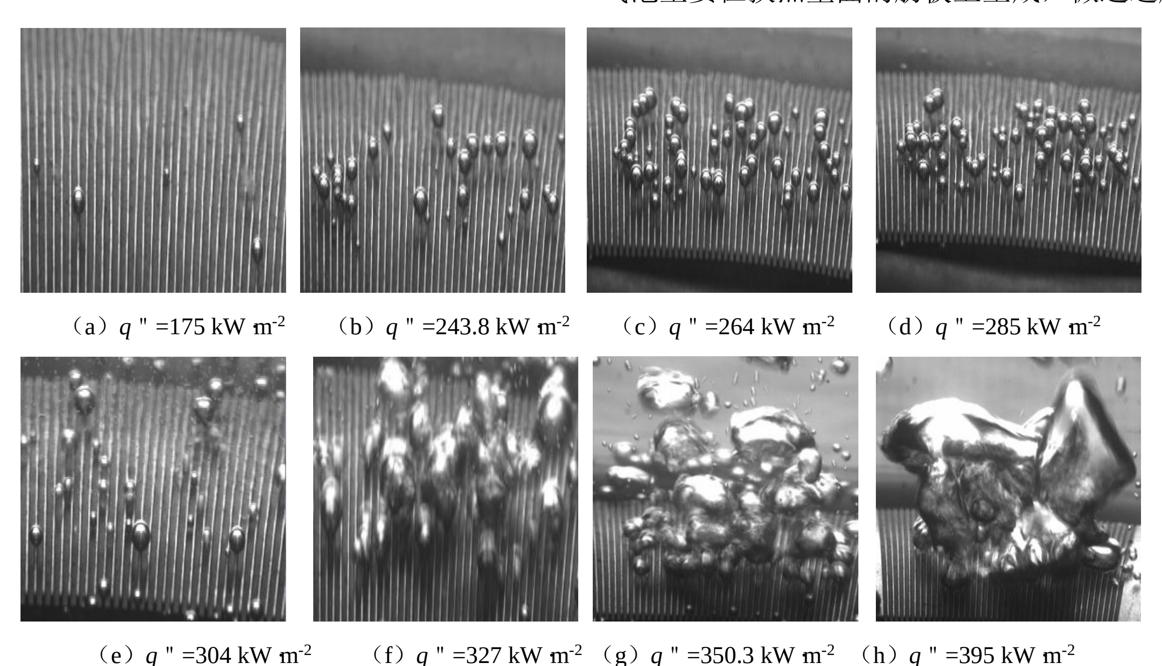


图 9 换热壁面沸腾曲线

Fig.9 Boiling curve of different surface

2.2 微纳耦合表面气泡状态

沸腾过程中气泡数量及状态关系到传热性能的好与坏。微纳耦合表面在不同热通量下的沸腾状况，如图 10 所示。从 q'' =175 kW m^{-2}（a）开始有气泡产生，随着热流密度的升高，有效气化核心的数量逐渐增多。在 q'' <264 kW m^{-2}（c）时气泡主要在换热壁面的肋板上生成，微通道底部



（a）q'' =175 kW m^{-2}　（b）q'' =243.8 kW m^{-2}　（c）q'' =264 kW m^{-2}　（d）q'' =285 kW m^{-2}

（e）q'' =304 kW m^{-2}　（f）q'' =327 kW m^{-2}　（g）q'' =350.3 kW m^{-2}　（h）q'' =395 kW m^{-2}

图 10 微纳耦合表面在不同热通量下的沸腾状况

Fig.10 Boiling of different heat flux on micro-nano surface

几乎没有产生气泡，这是由于肋板上的温度高于换热壁面的底部，壁面过热度相对于微通道的底部较大，底部的气化核心并未被激活。热流密度达到 285 kW m^{-2}（d）后，气泡在微通道内部产生并发生剧烈的合并，使得溶液在微通道内的湍流程度加剧，更多未完全发展的气泡开始脱离换热壁面底部。气泡在微通道内合并完成后，并没有立即脱离换热壁面，而是附着在肋板两侧继续生长，直到气泡达到临界状态。微通道底部依然有小气泡生成，并没有被大气泡完全覆盖。这可能是微纳耦合表面有效地提高 CHF 的原因。随着热流密度的增大，气泡的合并现象也越来越严重，脱离换热壁面的直径也逐渐增大，直到换热壁面被一个大气泡完全覆盖池沸腾达到了临界状态。

3 结 论

本文应用机械加工和电化学方法，在钛板表面制备出微纳耦合表面。研究了微纳耦合表面的强化传热特性，得出以下结论：

1）微槽表面、纳米多孔表面、微纳耦合表面降低了传热壁面的过热度，提高了 HTC 和 CHF。微纳耦合表面的 HTC 和 CHF 分别达到了 15.5 kW m^{-2}·℃$^{-1}$ 和 420.1 kW m^{-2}，分别提高了 158.3%和 50%，明显优于光滑表面。

2）由于纳米多孔表面的孔径尺度范围，当壁面过热度较低时，大孔可以形成活化中心；当壁面过热度到一定温度后，更小的活化中心被激活，过热度随着热流密度的上升出现有所下降趋势，曲线出现“后弯”现象。

3) 纳米多孔表面产生更多有效的汽化核心，微通道结构为气泡的继续生长提供了支撑，避免了换热壁面被合并的大气泡完全覆盖，有效地提高了换热壁面的 CHF。

参考文献

[1] Demir E, Izci T, Alagoz A S, et al. Effect of Silicon Nanorod Length on Horizontal Nanostructured Plates in Pool Boiling Heat Transfer with Water [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2014, 82(8): 111-121

[2] Yu C K, Lu D C. Pool Boiling Heat Transfer on Horizontal Rectangular Fin Array in Saturated FC-72[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50(17-18): 3624-3637

[3] Das A K, Das P K, Saha P. Performance of Different Structured Surfaces in Nucleate Pool Boiling[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(17): 3643-3653

[4] Kim S H, Lee G C, Kang J Y, et al. Boiling Heat Transfer and Critical Heat Flux Evaluation of the Pool Boiling on Micro Structured Surface[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 91(12): 1140-1147

[5] Shojaeian M, Koşar A. Pool Boiling and Flow Boiling on Micro-and-Nanostructured Surfaces [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2015, 63(5): 45-73

[6] Jun S, Kim J, Son D, et al. Enhancement of Pool Boiling Heat Transfer in Water Using Sintered Copper Microporous Coatings [J]. Nuclear Engineering and Technology, 2016, 48(4): 932-940

[7] Das S, Kumar D S, Bhaumik S. Experimental Study of Nucleate Pool Boiling Heat Transfer of Water on Silicon Oxide Nanoparticle Coated Copper Heating Surface [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 96(3): 555-567

[8] Sarangi S, Weibel J A, Garimella S V. Effect of Particle Size on Surface-Coating Enhancement of Pool Boiling Heat Transfer[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 81(2): 103-113

[9] Pratik KC, Abdullah N, Ashton T S, et al. Saturated Pool Boiling Heat Transfer from Vertically Oriented Silicon Surfaces Modified with Foam-like Hexagonal Boron Nitride Nanomaterials [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 95(4): 964-971

[10] Xu Pengfei, Li Qiang, Xuan Yimin. Enhanced Boiling Heat Transfer on Composite Porous Surface [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 80(1): 107-114

[11] 范永坚, 徐宏, 徐鹏. 竖直多孔管降膜蒸发传热实验[J]. 化工学报, 2016, 67(2): 512-518

FAN Yongjian, XU Hong, XU Peng. Heat Transfer Experiment of Falling-Film Evaporation in Vertical Porous Tube [J]. CIESC Journal. 2016, 67(2): 512-518

[12] Jaikumar A, Kandlikar S G. Ultra-High Pool Boiling Performance and Effect of Channel Width with Selectively Coated Open Microchannels[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 95(4): 795-805

[13] Deng Daxiang, Feng Junyuan, Huang Qingsong, et al. Pool Boiling Heat Transfer of Porous Structures with Reentrant Cavities[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 99(8): 556-568

[14] Patil C M, Kandlikar S G. Pool Boiling Enhancement through Microporous Coatings Selectively Electrodeposited on Fin Tops of Open Microchannels [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014,79(12)：816-828

[15] 王新亮. 二氧化钛纳米管阵列表面沸腾传热实验研究[D]. 天津：河北工业大学, 2013

WANG Xinliang. The Experimental Research of Boiling Heat Transfer with TiO_2 Nanotube Array Surface Titanium [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2013

[16] 汪亚桥, 莫冬传, 吕树申. 铜基双尺度多孔表面厚度对沸腾传热的影响[J]. 工程热物理学报, 2016, 37(7):1519-1522

WANG Yaqiao, MO Dongchuan, LV Shushen. Effects of Copper Micro-Nano Bi-Porous Surface Thickness on Boiling [J]. Journal of Engineering Thermalphysics, 2016, 37(7):1519-1522